*Separat-Abdruck aus den
„Annalen der Physik und Chemie".
1881. Neue Folge. Bd. XIV.*

I. *Bemerkungen über die Klangfarbe;*
von Dr. Rudolph Koenig in Paris.

---

1) Harmonische Töne und Theiltöne.

Unter den Tönen, in welche sich die von einem vibrirenden Körper ausgehende Klangmasse zerlegen lässt, muss man die harmonischen Töne und die Theiltöne unterscheiden. Letztere entstehen dadurch, dass der Körper gleichzeitig mehrere Schwingungsarten ausführt, welche verschiedenen Tönen zukommen, die er auch einzeln hervorzurufen im Stande ist, während die harmonischen Töne ihren Ursprung in der Zerlegung der von der Pendelbewegung abweichenden Schwingungsform des Körpers bei einem einzigen Schwingungsmodus in einfache Pendelbewegungen haben. Diese Theiltöne und harmonischen Töne unterscheiden sich ihrer Natur nach voneinander dadurch, dass die letzteren die harmonischen Schwingungszahlen stets in absoluter Reinheit geben, die Schwingungszahlen der Theiltöne dagegen in Wirklichkeit sich immer nur mehr oder weniger den ihnen theoretisch zukommenden Werthen nähern, und dieser Unterschied in der Natur beider Gattungen von Tönen lässt sich bei allen tönenden Körpern nachweisen, ihre Theiltöne mögen unharmonisch sein oder theoretisch mit Tönen der harmonischen Reihe zusammenfallen.

Von der absoluten Reinheit der harmonischen Intervalle der Töne, welche die Klänge solcher Körper bilden, die keine Theiltöne hervorbringen, wie z. B. der durchschlagenden Zungen, überzeugt man sich, indem man zwei Unisonogrundtöne um eine Schwebung verstimmt und dann die Schwebungen der Obertöne zählt; man constatirt dann, dass die letzteren in der That genau im Verhältniss der Ordnungs-

zahlen dieser Töne an Frequenz zunehmen, und beobachtet man harmonische Töne gleicher Ordnung beim Zusammenklange zweier Unisonogrundtöne mit reiner Stimmung, so findet man diese auch wieder immer im reinen Einklange miteinander; wendet man diese Beobachtungsmethode jedoch bei Theiltönen an, so lässt sie in allen Fällen die erwähnten Abweichungen derselben von den ihnen theoretisch zukommenden Werthen erkennen.

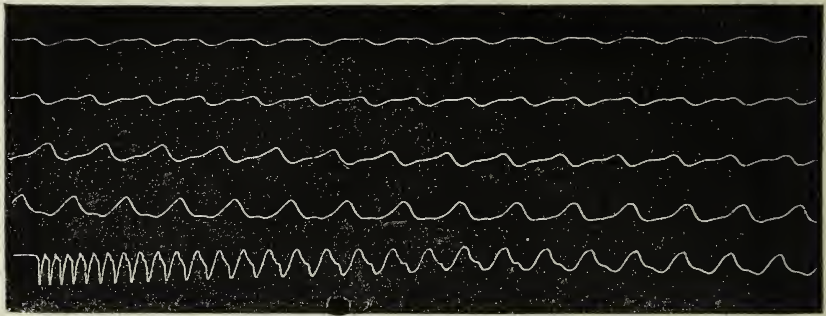
Beispiele für unharmonische Theiltöne findet man bei Stimmgabeln und bei Platten, und bei beiden bemerkt man stets, dass die Theiltöne weder mit dem Grundtone, noch untereinander in einem ganz festen Verhältniss stehen, denn die Theiltöne gleicher Ordnung bei zwei Stimmgabeln, deren Grundtöne im reinen Einklange sind, lassen immer mehr oder weniger schnelle Stösse hören, und hat man die Töne zweier Platten für dieselbe Klangfigur genau im Unisono gestimmt, so findet man die Töne derselben für andere Klangfiguren auch wieder nicht mehr im reinen Einklange.

Theiltöne, welche theoretisch mit harmonischen Tönen zusammenfallen, findet man zuerst bei Orgelpfeifen; aber sowohl bei den offenen wie bei den gedackten Pfeifen weichen sie beträchtlich von den harmonischen Schwingungszahlen ab, indem sie eine mit den Ordnungszahlen der Obertöne progressiv zunehmende Erhöhung über die Töne der harmonischen Reihe erkennen lassen. Schon Wertheim bemerkte, dass man bei der Bestimmung des Grundtones einer Pfeife durch einen ihrer Obertöne immer eine um so grössere Schwingungszahl für diesen erhielte, als man einen höheren Oberton anwendete, und ich selbst fand bei einer offenen Pfeife von 2,33 m Länge und 0,12 m Breite und Tiefe, dass die Erhöhung des achten Theiltones über den achten harmonischen Ton schon beinahe eine ganze Secunde erreichte, sodass er fast mit dem neunten harmonischen Tone zusammenfiel.

Ferner fallen auch die Theiltöne der Saiten theoretisch mit den harmonischen zusammen, und auch bei diesen lassen sich Abweichungen von der absoluten Reinheit der Intervalle wahrnehmen, welche bei langen, dünnen Metallsaiten allerdings nur sehr gering, und auch ziemlich schwer direct

zu beobachten sind. Die Saite durchläuft nämlich fast immer, wenn sie nach der Erregung sich selbst überlassen bleibt, die Bahn einer Ellipse, wodurch Variationen in der Intensität des Tones erzeugt werden, welche die Bestimmung sehr kleiner Tonunterschiede vermittelst der Stösse von Hülfsgabeln fast unmöglich machen, wie auch durch diese Form der Bewegung Beobachtungen mit dem Vibrationsmikroskop sehr erschwert werden. Die Verhältnisse ändern sich jedoch sofort, wenn man mit Saiten zu thun hat, welche den theoretischen Bedingungen einer idealen Saite weniger gut entsprechen, wie dieses z. B. bei den Darmsaiten der musikalischen Instrumente der Fall ist. Wenn man an einer 1 m langen dünnen Stahlsaite etwa in einem Drittel ihrer Länge ein Wachskügelchen von nur ungefähr der Grösse eines Stecknadelkopfes befestigt, reicht diese künstlich bewirkte Unregelmässigkeit in ihrer Structur schon hin, die harmonischen Verhältnisse zwischen ihren Theiltönen beträchtlich zu verstimmen, und stimmt man mit dieser Saite eine andere im Unisono und bringt auf beiden Theiltöne gleicher Ordnung hervor, so hört man diese deutlich miteinander schlagen, wie man umgekehrt auch, wenn man zwei Theiltöne gleicher Ordnung im Unisono gestimmt hat, wieder die Grundtöne nicht mehr im Einklang findet. Die Unregelmässigkeiten in der Form sowohl als auch in der Dichtigkeit der Materie, welche man bei den Darmsaiten vorfindet, sind aber immer weit beträchtlicher, als diese an der Stahlsaite künstlich bewirkte Abweichung von den normalen Verhältnissen, da zwischen den Tönen der beiden Hälften einer Violinsaite oft Unterschiede von einem halben bis zu einem ganzen Tone stattfinden, und man wird daher unbedingt annehmen können, dass im allgemeinen bei den Darmsaiten der musikalischen Instrumente die Theiltöne immer merklich von der Reinheit der harmonischen Intervalle abweichen. Wenn der Grundton einer solchen Saite von einem ihrer Theiltöne begleitet ist, so wird also die Form ihrer Schwingungen eine beständige Umwandlung erfahren müssen, und dieses nimmt man in der That wahr, wenn man in einem solchen Falle die Bewegung der Saite direct auf-

zeichnet. Eine solche Aufzeichnung ist in Fig. I wiedergegeben. Sie wurde mit einer Stahlsaite erhalten, in der zugleich der Grundton und die Octave erregt waren, welche Töne hier nur sehr wenig von der absoluten Reinheit des



Figur I.

Intervalles abwichen, jedoch schon in hinreichender Weise, um den allmählichen Wechsel der Phasendifferenz zwischen beiden deutlich zu zeigen. Um die lange Linie, welche diese Aufzeichnung bildete, bequemer in den Text einschalten zu können, ist sie in der Figur in fünf übereinander disponirten Stücken dargestellt worden. Weitere Beispiele für die allmähliche Umwandlung der Schwingungsform bei Saiten, die zwei oder mehrere ihrer Eigentöne zugleich geben, finden sich auch unter den zahlreichen Aufzeichnungen der Schwingungsbewegungen gestrichener Saiten, welche Cl. Neumann veröffentlicht hat.[1])

Wenn aber, wie alle diese Tonschriften zeigen, bei Saiten, welche die Bedingungen einer idealen Saite nicht genügend erfüllen, das gleichzeitige Auftreten des Grundtones und eines oder mehrerer Theiltöne Schwingungsbewegungen hervorruft, welche sich beständig transformiren, so geht hieraus auch hervor, dass, wenn die aufeinander folgenden Schwingungen solcher Saiten keine Veränderungen zeigen, aber ihre Formen von der Sinuscurve abweichen, diese Abweichung nicht eine Folge der Coëxistenz einer Reihe von

1) Cl. Neumann, Wien. Ber. 20. Jan. 1870. Taf. I Fig. 1—4.

Theiltönen sein kann, sondern dass die Saite in solchem Falle in ihrer ganzen Länge ohne Unterabtheilungen schwingt.

Im allgemeinen pflegt die Abweichung der Schwingungen eines Körpers, während er nur einen seiner Eigentöne gibt, von der einfachen Pendelbewegung um so grösser zu sein, und sein Klang somit auch aus um so zahlreicheren und stärkeren harmonischen Tönen zu bestehen, als die Amplituden seiner Vibrationen im Verhältniss zu seinem Querschnitt beträchtlicher sind. So kann man die harmonischen Töne bei Stimmgabeln nur wahrnehmen, wenn diese lange und dünne Zinken haben und mit verhältnissmässig weiten Amplituden schwingen, während bei dickarmigen, kurzen Stimmgabeln sie so schwach werden, dass sie sich gar nicht mehr nachweisen lassen. Bei Saiten, wo im Verhältniss zu ihrem Durchmesser die Schwingungen gewöhnlich eine beträchtliche Weite haben, und wenn sie gestrichen werden, auch die Wirkung des Bogens in ihnen eine von der Pendelbewegung sehr abweichende Schwingungsform erzeugt, ist es daher nicht auffallend, dass man fast immer in ihrem Klange zahlreiche und starke harmonische Töne hören kann, welche mit den Theiltönen ebenso wenig zu thun haben als die starken harmonischen Töne, welche man im Klange der durchschlagenden Zunge bemerkt, von irgend welchen Unterabtheilungen der Zungen herrühren. Hiermit ist natürlich nicht gesagt, dass die Schwingungen der Theiltöne nicht auch wirklich die Schwingungen des Grundtons bei Saiten begleiten und somit einen beträchtlichen Bestandtheil ihres Klanges bilden können, und bei der ausserordentlichen Leichtigkeit, mit welcher besonders lange Saiten in Schwingungen mit Unterabtheilungen gerathen, wird dieses sogar sehr oft, vornehmlich wenn die Saiten durch Anschlagen oder Reissen erregt werden, der Fall sein, doch zeigen obige Betrachtungen, dass man eben diese Töne nicht mit den harmonischen, welche aus der Zerlegung in einfache Pendelbewegungen der nur einem Eigenton der Saite zukommenden Schwingungen entstehen, verwechseln müsse, wie es gewöhnlich gethan wird.

2) Einfluss der Phasendifferenz der harmonischen Töne auf die Klangfarbe.

Würden Klangfarben nur durch den Zusammenklang von Theiltönen eines vibrirenden Körpers hervorgebracht werden, so hätte man bei ihnen nach dem Einfluss der Phasendifferenz nicht weiter zu fragen, da das charakteristische eines solchen Tongemisches gerade in dem beständigen Wechsel der Phasendifferenz der einzelnen Töne untereinander bestehen möchte. Da jedoch die harmonischen Töne, in welche sich die von einfachen Pendelbewegungen abweichenden Einzelschwingungen zerlegen lassen, durchaus reine Intervalle bilden, so ist die Lage nach dem Einfluss der Phasendifferenz bei diesen Klängen bekanntlich darum von der grössten Wichtigkeit, weil, je nachdem ein solcher Einfluss stattfindet oder nicht, die vor den Untersuchungen von Helmholtz über diesen Gegenstand gewöhnliche Annahme, dass die Klangfarbe von der Form der Schwingungen abhänge, beizubehalten ist, oder dahin abgeändert werden muss, wie Helmholtz es gethan, dass dieselbe Klangfarbe sehr verschiedenen Formen entsprechen kann, wenn nur diese Formen, in einfache pendelartige Schwingungen zerlegt, die gleichen Töne in gleicher Stärke geben.

Schon beim Zusammenklange zweier Unisonotöne, bei denen der Einfluss der Phasendifferenz so bedeutend ist, dass durch ihn die ganze Tonmasse zerstört werden kann, hat man bekanntlich besondere, sorgfältig hergerichtete Dispositionen nöthig, um die Interferenzerscheinungen deutlich hervortreten zu lassen, und wollte man dieselben untersuchen, während man eine grössere Anzahl Unisonotöne, also etwa acht Unisonostimmgabeln zusammenklingen liesse, so würde man sehr wenig deutliche Resultate erhalten. Untersuchungen über den Einfluss der Phasendifferenz beim Zusammenklange einer ganzen Reihe von harmonischen Tönen werden daher noch mehr erfordern, unter den günstigsten Verhältnissen angestellt zu werden, bei denen es möglich ist, die passendsten Fälle der Phasendifferenz zu beobachten, wenn man diesen Einfluss zur deutlichen Erscheinung bringen will. Es ist ferner zu bemerken, dass man die zu unter-

suchenden Klangfarben, wenn sie nur wenig von einander verschieden sind, eigentlich immer gleich für eine ganze Reihe von Grundtönen, statt nur für einen einzigen herstellen müsste, wenn das Ohr dieselben einigermassen gut soll beurtheilen können, denn die Fähigkeit des Ohres, kleine Unterschiede in der Klangfarbe wahrzunehmen, existirt meistens nur für den Fall, dass diese Klangfarben von ihm an den Tönen einer ganzen Melodie vernommen werden. Spielt man z. B. eine Melodie in ganz gleicher Weise auf zwei an Güte sehr verschiedenen Geigen, so ist der Unterschied höchst fühlbar, während man ihn bei Angabe nur eines Tones auf denselben beiden Instrumenten oft kaum bemerken kann, und ebenso erscheinen die Unterschiede in der Klangfarbe von Orgelpfeifen, welche alle auf denselben Ton gestimmt sind, aber verschiedenen Registern der Orgel angehören, oft äusserst gering, während diese Register bei der Ausführung von Musikstücken einen sehr merklich verschiedenen Charakter haben. Es findet hier in der Beurtheilung der Klangfarbe also etwas Aehnliches statt, wie bei der Beurtheilung der Tonhöhe schnell verklingender Töne, etwa der Töne der bekannten Holzbrettchen, welche, der Reihe nach auf den Fussboden geworfen, ganz deutlich die Tonleiter hören lassen, während schon ein besonders gut geübtes Ohr dazu gehört, die Tonhöhe eines einzelnen Brettchens zu erkennen.

Dass die Phasendifferenz zwischen den harmonischen Tönen überhaupt einen Einfluss auf die Klangfarbe haben müsse, dafür spricht schon die blosse Thatsache, dass gestörte harmonische Intervalle Stösse hören lassen, ganz abgesehen davon, welchen Ursprung man diesen zuschreiben mag. In der That, während der Schwebungen eines harmonischen Intervalles empfängt das Ohr einen periodisch wechselnden Eindruck, und ein solcher kann beim Zusammenklange zweier harmonischer Töne, die nie einen Stosston erzeugen, nur dadurch hervorgerufen werden, dass entweder beide Töne zugleich an Intensität periodisch zu- und abnehmen, dass sie dieses abwechselnd thun, oder dass nur einer der beiden Töne allein periodisch seine Intensität wechselt. In den letzten beiden Fällen würde also dass Intensitätsverhältniss

zwischen beiden Tönen, und folglich auch die Klangfarbe, während einer Schwebung zugleich mit der Phasendifferenz beständig verändert werden, und wäre es ein gleichmässiges Anschwellen und Abnehmen beider Töne, welches die Periodicität des Eindruckes bedingte, so möchte allerdings die Klangfarbe, so lange sie nur aus diesen beiden Tönen bestände, während der ganzen Dauer der Schwebung dieselbe bleiben, sie würde aber dann wieder sofort Umwandlungen erleiden, wenn zu diesen beiden Tönen noch ein anderer hinzuträte, dessen Intensität, während sie Schwebungen ausführten, unverändert bliebe. Helmholtz nennt zwar den während einer Schwebung zwischen zwei nicht ganz rein in der Octave gestimmten Tönen erzeugten Wechsel in der Klangfarbe eine nur „scheinbare Ausnahme"[1]) von der von ihm aufgestellten Regel, dass die Phasendifferenz ohne Einfluss auf die Klangfarbe sei, weil sich „dieser Wechsel auf Veränderung der Tonstärke eines der Töne zurückführen lasse", wenn jedoch die Klangfarbe gerade durch die harmonischen Töne und ihre relative Intensität bedingt werden soll, und dieses Intensitätsverhältniss durch den Phasenunterschied wirklich geändert wird, so ist auch ihr Einfluss auf die Klangfarbe natürlich ein thatsächlicher und nicht nur ein scheinbarer. Es kann hiernach also die Frage nicht mehr sein, ob die Phasendifferenz der harmonischen Töne überhaupt einen Einfluss auf die Klangfarbe äussere, sondern nur noch, wie gross derselbe unter verschiedenen Umständen sein könne, und wie viel das Ohr davon wahrzunehmen im Stande ist.

Die Anwendung von Stimmgabeln mit Resonanzröhren für diese Experimente ist mit grossen Schwierigkeiten verbunden, da es selbst mit Hülfe der von Helmholtz gegebenen Regel[2]) schwer ist, eine sichere Schätzung der Phasendifferenz der Töne zu machen, welche man durch die Verstimmung der Resonanzröhren hervorruft. Es liegt nämlich dieser Regel die Voraussetzung zu Grunde, dass die Be-

1) Helmholtz, Tonempfindungen **4.** p. 207. 1877.
2) l. c. p. 202.

wegung der Stimmgabeln selbst immer durchaus ohne Phasendifferenz stattfindet und auch nicht durch die Resonanzröhren beeinflusst wird, was man jedoch nicht unbedingt annehmen kann. Die Experimente, welche ich hierüber angestellt habe, waren nicht ausgedehnt genug, um das allgemeine Gesetz des Verhaltens einer electrisch bewegten Gabel unter dem Einflusse eines mehr oder weniger verstimmten Resonators so vollständig erkennen zu lassen, als frühere von mir angestellte Versuche die Einwirkung einer resonirenden Luftmasse auf eine freischwingende Gabel gezeigt hatten, sie reichten jedoch aus, im allgemeinen die Existenz einer solchen Einwirkung darzuthun, wie folgendes Beispiel zeigt.

Stimmte eine electrische Gabel $\bar{c}$ (ut_3), während sie durch ein freischwingendes Vibrationsmikroskop c (ut_2), beobachtet wurde, in der absolut reinen Octave mit diesem, wenn die dicht hinter ihr disponirte Resonanzröhre geschlossen war, und wurde diese dann geöffnet, so verringerte sich die Amplitude ihrer Schwingungen plötzlich fast um die Hälfte, und zugleich begann die optische Figur sich zu bewegen, und zwar ziemlich schnell, sodass sie eine halbe Drehung schon in etwa sechs Secunden ausführte, dann immer langsamer, bis sie nach 20 Secunden ungefähr drei Viertel einer Drehung erreicht hatte, worauf sie schliesslich wieder zur Ruhe gelangte. Wurde die Resonanzröhre darauf von neuem geschlossen, so nahmen die Schwingungen der Gabel wieder ihre frühere Amplitude an, ohne dass aber dabei eine ähnliche Drehung der Figur, etwa in entgegengesetzter Richtung, als die vorher beobachtete, bemerkt wurde.

Es läge nun der Gedanke nahe, die Töne der Stimmgabeln ohne Resonatoren direct durch gleichlange Röhrenleitungen zum Ohre zu führen und dann beliebige Phasendifferenzen durch passende Verlängerungen dieser Leitungen herzustellen, wie bei dem bekannten Interferenzapparate; doch abgesehen davon, dass auch diese Röhren unter Umständen wie Resonatoren wirken könnten, empfängt das Ohr am Ende einer solchen Leitung nicht Fortpflanzungswellen, die an ihm vorüberziehen, sondern es bilden sich in der Röhre immer, wenn ihre Länge gleich einer ungeraden Anzahl

Viertelwellen ist, stehende Wellen, und das Ohr befindet sich dann in einem Knoten derselben, sodass derselbe Ton in diesen Fällen ausserordentlich viel stärker vernommen wird, als bei den Zwischenstellungen der Auszugsröhre, und man also eine Leitungsröhre nie verlängern kann, ohne auch die Intensität des beobachteten Tones zu verändern. — Um sich hiervon zu überzeugen, hat man nur eine Stimmgabel $\bar{\bar{c}}$ vor einem Ende der ausziehbaren Röhre des schon erwähnten Interferenzapparates zu disponiren und das andere Ende durch einen Kautschukschlauch mit dem Ohre zu verbinden; verlängert man dann die Leitung, so hört man die Stellen grösster Intensität sehr deutlich und sieht, dass die Verlängerung von einer zur anderen etwa 0,32 m beträgt.

Aus diesen Gründen ist bei Untersuchungen über den Einfluss der Phasendifferenz der Obertöne auf die Klangfarbe, der Anwendung von Reihen electrisch bewegter Stimmgabeln in Verbindung mit Resonatoren oder Leitungsröhren die von Wellensirenen bei weitem vorzuziehen.

Bei der Wellensirene wird, wie ich dieses schon in einer früheren Arbeit[1]) beschrieben habe, eine bestimmte Schwingungsbewegung in der Luft dadurch erzeugt, dass eine diese Bewegung darstellende Curve, welche am Rande eines Metallstreifens ausgeschnitten ist, vor einer schmalen Windspalte vorbeigleitet und diese somit nach ihrem Gesetze periodisch verkürzt und verlängert, man kann also einen aus bestimmten harmonischen Tönen bestehenden Klang entweder dadurch erzeugen, dass man die Composition der diesen harmonischen Tönen zukommenden Wellenlinien ausführt und gegen die auf solche Weise entstandene Wellencurve durch die Windspalte bläst, oder indem man gleichzeitig jeden der harmonischen Töne gesondert für sich durch Anblasen einfacher, ihren Schwingungszahlen zukommender Sinuscurven hervorruft.

Bei sämmtlichen Wellenlinien, welche ich für die Untersuchungen vermittelst der ersten Methode construirte, betrug die Länge der Sinusoide des Grundtones 0,84 m, und die

1) R. Koenig, Wied. Ann. **12.** p. 335. 1881.

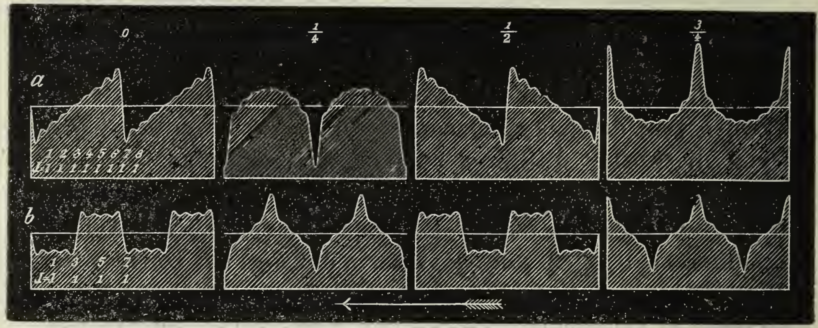
aus der Composition der verschiedenen harmonischen Wellenlinien erhaltenen Curven wurden photographisch auf die für die Experimente passende Grösse reducirt. Diese Curven, an den Rändern von Messingstreifen ausgeschnitten, die um Räder befestigt waren, rotirten vor Windspalten, die mit einem sehr grossen Luftreservoir in Verbindung standen und durch Tasten beliebig geöffnet oder geschlossen werden konnten.

In Fig. II, III und IV enthält jede Horizontallinie in verjüngtem Maassstabe vier Wellencurven, wie sie aus der Composition derselben harmonischen Sinuscurven entstehen, wenn diese alle mit ihren Anfangspunkten, einem Viertel, der Hälfte, und drei Viertel ihrer Wellenlänge zusammenfallen, welche Fälle ich im Folgenden immer kurz mit Phasendifferenz 0, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ und $\frac{3}{4}$ bezeichnen werde. Unter jeder Wellenlinie sind die harmonischen Töne nebst ihren Intensitäten (J) verzeichnet, welche den Sinuscurven entsprechen, aus deren Composition sie entstanden ist. In Fig. III *c*, *d*, bedeutet H die absolute Höhe der componirten Sinuscurven. Alle Curven mussten natürlich immer in der Weise in die Ränder der Metallstreifen eingeschnitten werden, dass ihre Wellenberge in diese wie Thäler einschnitten, und ihre Wellenthäler wie Berge stehen blieben, denn es sind die Einschnitte, welche die Windspalten öffnen und somit die Intensitätsmaxima der Luftwellen erzeugen, während die vorstehenden Spitzen sie verkürzen und somit die Minima bilden. Gibt man hierauf nicht Acht, so kann man sich leicht in der Phasendifferenz um eine halbe Doppelschwingung irren und also z. B. eine Composition harmonischer Sinuscurven mit der Phasendifferenz $\frac{1}{4}$ für die Composition mit der Phasendifferenz $\frac{3}{4}$ halten.

Lässt man vorerst den Grundton nur von seiner Octave gleicher Intensität begleiten, so erhält man bei der Phasendifferenz $\frac{1}{4}$ den stärksten, und bei der Phasendifferenz $\frac{3}{4}$ den schwächsten Klang, während die Klänge bei den Phasendifferenzen 0 und $\frac{1}{2}$ zwischen beiden stehen.

Beim Zusammenklange der ersten acht harmonischen Töne von gleicher Intensität, Fig. II *a*, sind die Unterschiede

in der Intensität und der Klangfarbe bei den verschiedenen Phasendifferenzen noch weit beträchtlicher. Die ganze Klangmasse ist am lautesten und schärfsten bei der Phasendifferenz $\frac{1}{4}$, am schwächsten und sanftesten bei der von $\frac{3}{4}$. Zwischen beiden stehen wieder die Klänge mit den Phasendifferenzen 0 und $\frac{1}{2}$.

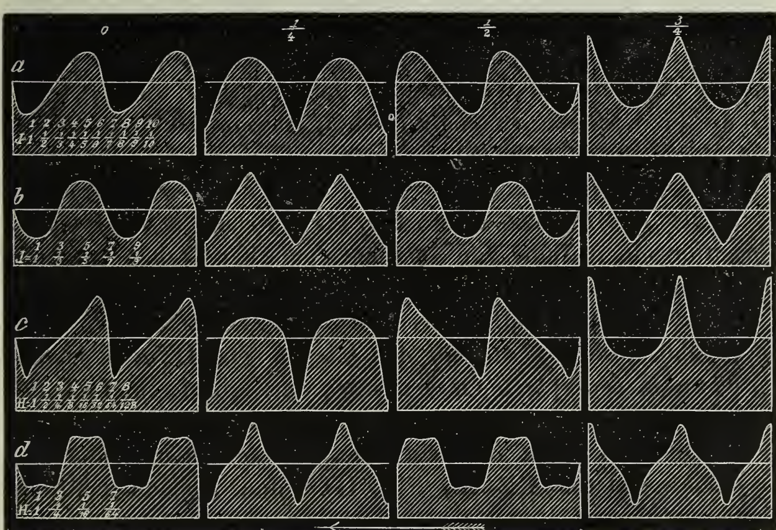


Figur II.

Beim Zusammenklang der Töne 1, 3, 5, 7 gleicher Intensität, Fig. II *b*, ist die Wellenform bei den Phasenunterschieden 0 und $\frac{1}{2}$ dieselbe, und ebenso die bei den Phasendifferenzen von $\frac{1}{4}$ und $\frac{3}{4}$. Letztere gibt einen starken, näselnden Klang, wogegen bei den Phasendifferenzen 0 und $\frac{1}{2}$ der Klang äusserst schwach wird, weicher und weniger näselnd erscheint.

Es ist natürlich sehr schwer, eine genaue, deutliche Beschreibung solcher Klangunterschiede zu geben, doch kann man sich mitunter dadurch helfen, dass man die betreffenden Klänge für denselben Grundton mit Vocalen vergleicht, mit denen man ihre Aehnlichkeit leicht auffindet, wenn man sie nachzusingen versucht. So liess sich die aus dem Zusammenklang der vier ungeradzahligen harmonischen Töne entstehende Klangfarbe bei einer gewissen Höhe des Grundtones sehr gut mit einem *ae* vergleichen, welches, wenn keine Phasendifferenz zwischen den Tönen stattfand, mehr nach dem *e* hinneigte, während beim Zusammenfallen aller Viertelwellen in diesem *ae* das *a* mehr hervortretend war.

Klangfarben, wie die bisher untersuchten, bei denen alle harmonischen Töne gleiche Intensität mit dem Grundtone haben, dürften in Wirklichkeit wohl kaum von irgend einem tönenden Körper direct erzeugt werden, und hat man solche Klänge für musikalische Zwecke nöthig, so erzeugt man sie daher dadurch, dass man eine ganze Reihe einzeln hervorgebrachter harmonischer Töne zugleich erklingen lässt, wie in den Mixturen der Orgel, sie sind daher nicht Klangfarben im eigentlichen Sinne des Wortes und eher Zusammenklänge zu nennen. Sehr häufig werden dagegen Klänge von vibrirenden Körpern direct hervorgebracht, bei denen die Intensität der harmonischen Töne nach einem bestimmten Gesetze regelmässig abnimmt, so z. B. von Zungenpfeifen ohne Ansatzröhren, von Saiten, die nur mit einem ihrer Eigentöne schwingen, und von sehr dünnarmigen, langen Stimmgabeln.



Figur III.

Die Curven, welche aus der Composition der Sinusoiden entstehen, die einer solchen Reihe von Tönen mit regelmässig abnehmender Intensität entsprechen, gehen immer

schliesslich in eine sehr einfache, continuirlich auf- und absteigende Wellenlinie über. Bei der Grösse, in welcher ich meine Curven ausführte, musste ich, im Falle die Intensität der harmonischen Töne im umgekehrten Verhältniss ihrer Ordnungszahlen angenommen wurde, Fig. III *a*, in der Construction bis zum elften Tone gehen, um dieser einfachen Form praktisch so nahe als möglich zu kommen; verringerte ich jedoch die Intensität der harmonischen Töne von einem zum anderen immer um die Hälfte, so wurde die einfache Form praktisch schon beim sechsten Tone erreicht. Die Curve, welche aus dieser letzten Composition entstand, habe ich in Fig. III nicht gegeben, da sie so wenig von der vorhergehenden, Fig. III *a* verschieden ist, dass bei dem kleinen Maassstabe der Unterschied kaum zu bemerken gewesen sein würde.

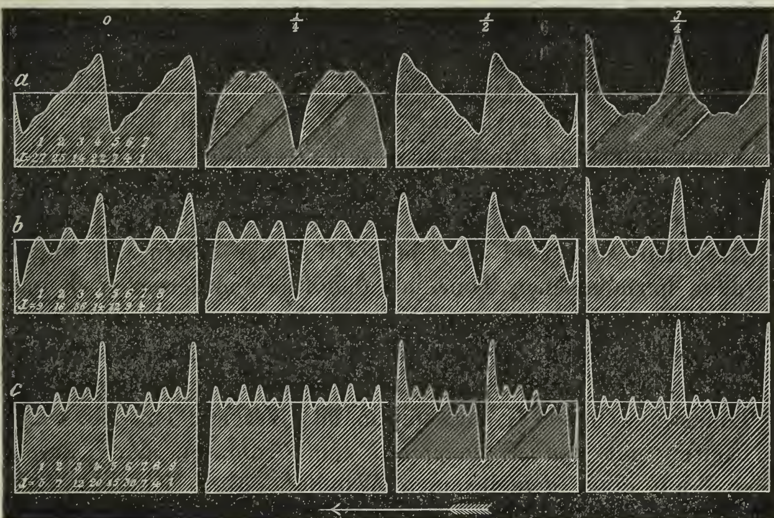
Auch diese beiden Klänge mit harmonischen Tönen von regelmässig abnehmender Intensität hatten wie die Zusammenklänge harmonischer Töne von gleicher Stärke die lauteste und schärfste Färbung bei der Phasendifferenz $\frac{1}{4}$ und die schwächste und sanfteste bei der Phasendifferenz $\frac{3}{4}$, während die Klangfarben der Phasendifferenzen 0 und $\frac{1}{2}$ sowohl in Bezug auf die Stärke als auch auf die Schärfe zwischen beiden standen.

Mit den Wellencurven, Fig. III *c*, welche aus der Composition einer Reihe von acht harmonischen Wellen entstanden sind, deren absolute Höhe sich immer von einer zur anderen um die Hälfte verringert, erhält man wieder ganz ähnliche Resultate wie mit den Curven Fig. III *a*, d. h. die Phasendifferenz $\frac{1}{4}$ erzeugt den stärksten, schärfsten, und die Phasendifferenz $\frac{3}{4}$ den schwächsten, weichsten Klang.

Die zwei allein aus ungeraden harmonischen Tönen zusammengesetzten Klänge, Fig. III *b* und *d*, sind bei der Phasendifferenz $\frac{1}{4}$ und $\frac{3}{4}$ beide stärker und schärfer als bei der Phasendifferenz 0 und $\frac{1}{2}$.

Eine dritte Klasse bilden die Klänge, bei welchen die harmonischen Töne nicht regelmässig an Stärke abnehmen, sondern abwechselnd bald schwächer, bald stärker sind. Sie werden gewöhnlich nicht von den vibrirenden Körpern direct

hervorgebracht, sondern dadurch, dass einzelne Töne der durch einen vibrirenden Körper erzeugten, an Intensität regelmässig abnehmenden harmonischen Reihe durch die Resonanz anderer Körper verstärkt werden, wie dieses bei Zungenpfeifen der Fall ist, über denen Schallröhren befestigt sind, oder bei der menschlichen Stimme, die, im Kehlkopfe



Figur IV.

erzeugt, durch die Resonanz der Luftmasse in der Mundhöhle modificirt wird. Dieser Art von Klängen entsprechen die Curven Fig. IV *a*, *b* und *c*, bei deren Construction ich für die harmonischen Töne die Intensitäten angenommen hatte, welche sie nach Auerbach bei den Vocalklängen *Ou*, *O*, *A* mit dem Grundtone *c* (ut_2) haben sollen, nämlich für *Ou*, Fig. IV *a*, indem die Intensität der ganzen Tonmasse gleich 100 gesetzt wird, $1 = 27$, $2 = 25$, $3 = 14$, $4 = 22$, $5 = 7$, $6 = 4$, $7 = 1$; für *O*, Fig. IV *b*, $1 = 9$, $2 = 16$, $3 = 36$, $4 = 14$, $5 = 12$, $6 = 9$, $7 = 4$, $8 = 1$, und für *A*, Fig. IV *c*, $1 = 5$, $2 = 7$, $3 = 12$, $4 = 20$, $5 = 15$, $6 = 30$, $7 = 7$, $8 = 4$, $9 = 1$. — Ich untersuchte diese drei Klänge nur bei den Phasendifferenzen 0 und $\frac{1}{4}$, und fand dabei immer die Klänge stärker und schärfer bei

der Phasendifferenz $\frac{1}{4}$, als bei der Phasendifferenz 0, doch war der Unterschied nicht in allen drei Fällen gleich gross, sondern am bedeutendsten bei Fig. IV*a* und am geringsten bei Fig. IV*c*.

Beiläufig sei übrigens hier erwähnt, dass diese drei Curven in Bezug auf die Nachahmung der Vocale ungenügende Resultate geben, nur mit Fig. IV*c* erhielt man bei kurzer, stossweiser Hervorbringung des Klanges ein erträglich gutes *A*, jedoch nicht für den Grundton *c*, sondern wenn dieser in die Gegend von *f* (fa_2) und *g* (sol_2) fiel.

Für die Wiederholung dieser Experimente dient am zweckmässigsten ein Apparat mit drei Rädern und sechs Wellencurven, von denen vier die Composition derselben acht harmonischen Töne mit den Phasendifferenzen 0, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ und $\frac{3}{4}$ darstellen, und zwei die Composition der ersten vier ungeraden harmonischen Töne mit den Phasendifferenzen 0 und $\frac{1}{4}$. Man kann dann sowohl den Unterschied in der Klangfarbe beobachten, welcher allein durch die Phasendifferenz bedingt wird, wie auch zwei aus verschiedenen harmonischen Tönen bestehende Klänge miteinander vergleichen. Die sechs Röhren mit den Windspalten zum Anblasen der Curven sind auf einer gemeinsamen Windlade über Schiebern befestigt, welche gestatten, sie nach Belieben zu öffnen und zu schliessen, und es ist unnöthig, für diese Windlade die grossen Dimensionen beizubehalten, welche ihr für die Untersuchungen gegeben waren.

Wie man aus den Figuren II, III und IV ersieht, entstehen aus der Composition einer Reihe harmonischer Sinuscurven in den Wellenlinien oft grosse Steilheiten, und man könnte daher geneigt sein, auf Grund dieses Umstandes anzunehmen, dass die Form der Luftwellen, wie sie durch die hier angewendete Methode erzeugt wurden, nur wenig den Curven entsprach, gegen welche man die Windspalte richtete. Da jedoch die Wellenstreifen keineswegs so dicht vor den Windspalten rotiren, dass sie in Wirklichkeit den Ausfluss der Luft aus diesen hindern könnten, selbst in den Augenblicken, in denen sie mit ihren höchsten Wellenbergen vor ihnen vorübergehen, so dürften die etwaigen Druckverände-

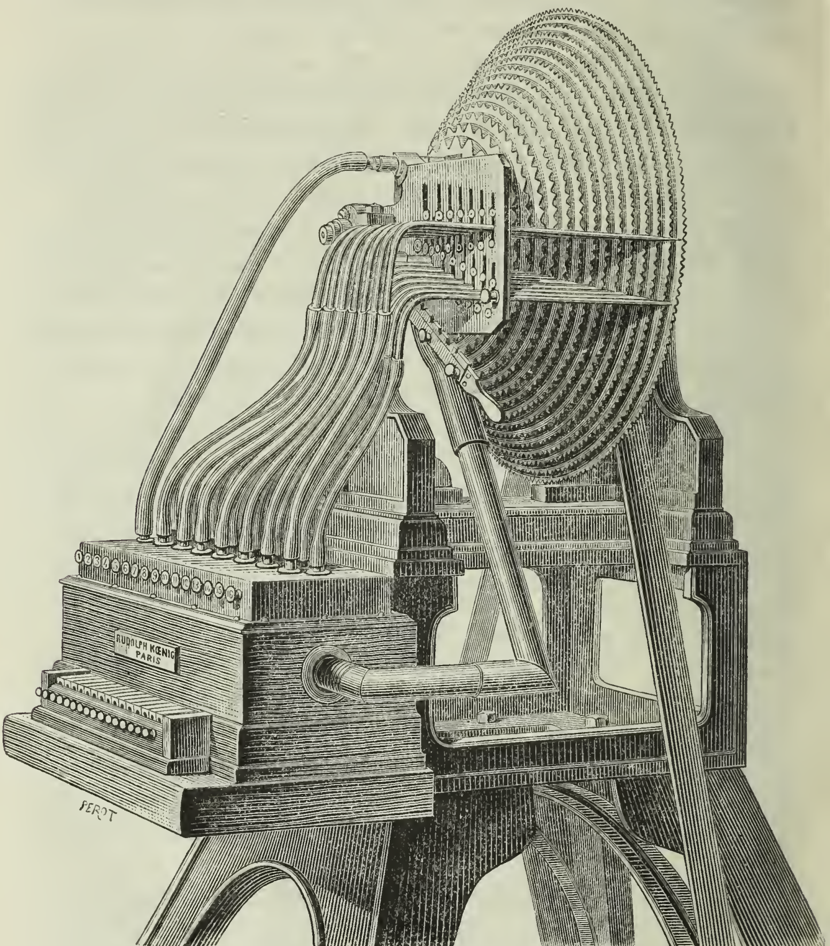
rungen in der Luftmasse der Windlade wohl praktisch zu vernachlässigen sein, ganz fällt aber dieser Einwand gegen die Genauigkeit der Methode fort, wenn man die Klänge, welche man den Untersuchungen unterwirft, aus einzeln hervorgebrachten harmonischen einfachen Tönen bildet, die durch das Anblasen von Sinuscurven erzeugt werden.

Der erste Apparat, welchen ich nach diesem Principe mit sechszehn einfachen Tönen für Untersuchungen über die Klangfarbe in den Jahren 1867 und 1868 construirte, war bestimmt, durch ein Uhrwerk getrieben zu werden, und es musste daher der rotirende Theil, der in einem Cylindermantel bestand, in welchem sich die Oeffnungen befanden, deren Ränder aus Sinuscurven gebildet waren, möglichst leicht, also in Aluminium ausgeführt werden. Bei dem neuen Apparate ist diese Leichtigkeit einer grösseren Solidität geopfert worden. Er ist in Fig. V ohne das Fussgestell mit dem Schwungrade, der Kurbel und dem Pedal dargestellt.

Die Sinuscurven, welche die ersten sechszehn harmonischen Töne darstellen, sind an den Rändern von sechszehn Messingringen ausgeschnitten, deren Diameter vom ersten bis zum letzten progressiv grösser werden, und welche in einer gewissen Entfernung hintereinander auf einem stufenförmigen Kegel von Gusseisen befestigt sind, der auf einer Axe sitzt. Beim Rotiren gehen diese Sinuscurven an Windspalten vorüber, durch welche sie angeblasen werden. Es entstehen hierdurch einfache Töne, so lange die Spalten sich in ihrer ursprünglichen Lage, d. h. in der Richtung des Radius befinden, oder Klänge, bei denen die Grundtöne von einer Reihe regelmässig an Intensität abnehmender harmonischer Töne begleitet sind, wenn man diesen Spalten eine schräge Stellung gibt.

Die Windröhren sind auf einer Platte montirt, auf welcher sie in concentrirten Spalten verschoben werden können, um die Herstellung beliebiger Phasendifferenzen zwischen den einzelnen Tönen zu gestatten. Diese Verschiebungen werden vermittelst kammartig ausgeschnittener Platten bewirkt, welche man auf einem um die Axe des Apparates drehbaren Hebelarme befestigt, und gegen deren Zähne die

Windröhren durch Kautschukbänder gedrückt werden. Bewegt man diesen Hebelarm aufwärts bis zu einer bestimmten Höhe, so hebt man dabei sämmtliche Windspalten in die durch die Form des Kammes vorher bestimmte Lage.



Figur V.

Die Windröhren stehen durch Kautschukschläuche, welche ihre Verschiebungen nicht hindern, mit einer Windlade in Verbindung, und der Wind, welcher durch Niederdrücken

der Tasten in die Röhren getrieben wird, geht auf seinem Wege in der Windlade durch Löcher, die man durch Schieber mehr oder weniger schliessen kann, um somit seine Intensität und also auch die der Töne beliebig zu reguliren.

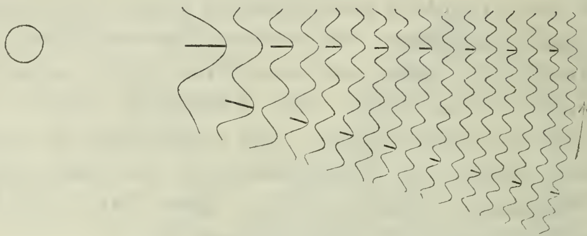
Um dem Grundtone mehr Kraft zu geben, der, durch eine einzige Spalte angeblasen, wegen seiner Tiefe verhältnissmässig nur schwach ist, kann man den Wind gegen seine Sinuscurven nicht allein durch eine Windspalte blasen lassen, welche wie die aller anderen Töne angeordnet ist, sondern auch noch durch vier Windröhren, die auf einem gemeinsamen Windkasten stehen, welcher direct durch eine Röhre mit der Windlade in Verbindung steht.

Man erhält Töne, welche von der Reinheit der harmonischen Intervalle abweichen, um Theiltöne nachzuahmen, indem man Windröhren auf einem um die Axe des Apparates drehbaren Hebelarme befestigt und diesen in der Richtung der Rotationsbewegung der Sinuscurve bewegt, wenn man die Töne der Curven, gegen welche man bläst, vertiefen will, oder ihn eine entgegengesetzte Bewegung machen lässt, wenn man diese Töne zu erhöhen wünscht.

Der Apparat ist auf einem starken Gestelle von Gusseisen montirt und wird durch ein Schwungrad in Bewegung gesetzt, welches entweder mit der Hand vermittelst einer Kurbel oder mit dem Fusse durch ein Pedal gedreht wird. Man fängt damit an, dasselbe erst ganz langsam mit der Hand in Bewegung zu setzen, worauf man dann die Rotationsgeschwindigkeit allmählich so lange vergrössert, bis die Töne die gewünschte Höhe erreicht haben. Diese Geschwindigkeit kann man dann sehr leicht mit dem Pedal unterhalten, und es gelingt sogar, sie recht constant zu bewahren, Dank der beträchtlichen Masse des Kegels von Gusseisen. Natürlich könnte man auch jede andere Triebkraft anwenden, um den Apparat in Bewegung zu setzen.

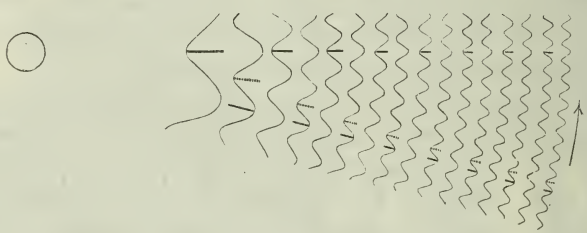
Fig. VI zeigt die ursprüngliche Disposition der Luftspalten auf zwei Radien vor den Sinuscurven der geradzahligen und der ungeradzahligen Töne. Ist der Kegel so gestellt, dass sich vor der immer unverändert fest bleibenden Spalte des ersten Tones ein Gipfel der Sinuscurve

befindet, so liegen zugleich auch alle anderen Spalten vor Wellengipfeln und werden also im selben Augenblicke geschlossen werden, sodass alle ihre Töne mit $\frac{3}{4}$ ihrer Wellenlänge zusammenfallen.



Figur VI.

Will man die Compressionsmaxima aller Töne zusammenfallen lassen, so dreht man zu diesem Zwecke den Kegel, bis die Spalte des ersten Tones vor einem Wellenthale der ausgeschnittenen Curve zu stehen kommt; die Spalten der

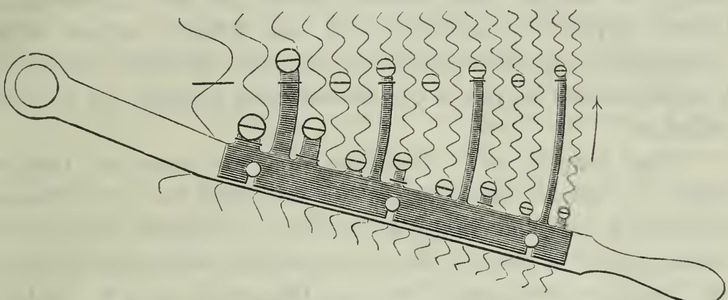


Figur VII.

ungeraden Töne befinden sich dann auch alle vor Wellenthälern ihrer Curven und werden also zugleich mit der Spalte des Grundtones geöffnet, die unverrückten geradzahligen Spalten befinden sich dagegen im selben Augenblicke vor Wellengipfeln ihrer Curven und werden folglich geschlossen, sie müssen also jede um eine halbe Curvenlänge, nach den punktirten Stellen Fig. VII, verschoben werden. Ist dies geschehen, so fallen dann alle Töne mit $\frac{1}{4}$ ihrer Wellenlänge zusammen.

Sollen alle Töne ohne Phasendifferenz zusammenklingen, und hat man die erste Spalte vor den Anfangspunkt ihrer Wellencurve gestellt, so befinden sich von den anderen

Spalten nur noch die 5., 9. und 13. von selbst in der ihnen zukommenden Lage, und alle anderen müssen nach den punktirten Stellen verschoben werden, wie Fig. VIII zeigt, auf der auch der hierzu dienende Kamm mit dem Hebelarme dargestellt ist.



Figur VIII.

Würde man die Rotationsrichtung der Curven umkehren, so erhielte man bei derselben Stellung der Spalten den Zusammenklang der Töne bei der Phasendifferenz $\frac{1}{2}$; um jedoch die Klangfarbe desselben Zusammenklanges bei den Phasendifferenzen 0 und $\frac{1}{2}$ bequem vergleichen zu können, müssen die Spalten sich von der vorhergehenden Disposition auch noch nach den Fig. IX angezeichneten Stellen verschieben lassen.



Figur IX.

Für die ungeraden Spalten sind diese dieselben wie bei der Phasendifferenz 0, und es erfordern daher nur die Spalten der geraden Töne eine Verrückung, welche hier für die Spalten 8, 12 und 16 um die Länge einer ganzen Wellencurve grösser angegeben ist, als nöthig gewesen wäre, wenn

man sie aus ihrer ursprünglichen Lage nur bis zu den nächst gelegenen, der erforderten Bedingung entsprechenden Punkten hätte verschieben wollen. Stellt man aber die Spalten erst für die Phasendifferenz 0 ein, indem man den Kamm von Fig. VIII auf der Platte, welche alle Windröhren trägt, befestigt, so werden diese ersten Punkte der drei angegebenen Curven durch ihn verdeckt, und man könnte folglich nicht vermittelst eines auf dem Hebelarme für die Phasendifferenz $\frac{1}{2}$ angebrachten Kammes die betreffenden Spalten an sie hinschieben.

Fügt man zu dem Grundton erst nur noch die Octave hinzu, so ist die Klangmasse am lautesten bei der Phasendifferenz $\frac{1}{4}$, und hat zugleich in ihrem Charakter etwas Tieferes, als ob in ihr der Grundton mehr vorherrschend wäre, sie ist am schwächsten bei der Phasendifferenz $\frac{3}{4}$. Achtet man nur auf die Octave, während man den Wechsel in der Phasendifferenz ausführt, so scheint dieselbe bei den Phasendifferenzen $\frac{1}{4}$ und $\frac{3}{4}$ ungefähr gleich stark zu sein, jedoch sehr merklich schwächer zwischen beiden.

Klänge, welche nur aus Tönen der ungeradzahligen harmonischen Reihe bestehen, deren Intensitäten sein mögen, welche sie wollen, sind bei den Phasendifferenzen $\frac{3}{4}$ und $\frac{1}{4}$ immer lauter und schärfer, als bei den Phasendifferenzen 0 und $\frac{1}{2}$, lassen jedoch unter sich nicht den geringsten Unterschied wahrnehmen, wie auch die Klänge bei 0 und $\frac{1}{2}$ unter sich identisch sind. An und für sich ist dieses allerdings ein selbstverständliches Resultat, da in diesen Fällen die aus der Composition aller Töne entstehenden Wellencurven durchaus gleich sind, wie die Figuren II *b*, III *b*, *d* zeigen, es hat aber hier seine Wichtigkeit als eine Probe für die Zuverlässigkeit der Leistungen des angewendeten Apparates.

Klänge aus harmonischen Tönen zusammengesetzt, welche sowohl der gerad-, als der ungeradzahligen Reihe angehören, sind bei der Phasendifferenz $\frac{3}{4}$ am schwächsten und bei der Phasendifferenz $\frac{1}{4}$ am stärksten und schärfsten, und dies stimmt mit den Resultaten überein, die das Anblasen von Curven ergeben hatte, welche die ganzen Klänge darstellten.

Die Klänge bei den Phasendifferenzen 0 und $\frac{1}{2}$, welche

in Bezug auf die Intensität, als auch auf die Schärfe zwischen den Klängen mit den Phasendifferenzen $\frac{3}{4}$ und $\frac{1}{4}$ liegen, scheinen untereinander auch nicht ganz gleich zu sein, wie man dieses eigentlich erwarten sollte, da sie durch dieselbe Curve dargestellt werden, welche nur nach verschiedenen Richtungen liegt (Fig. II, III und IV). Bei den Experimenten, bei welchen die den ganzen Klang darstellenden Curven angeblasen wurden, schien mir dieser Unterschied zweifelhaft zu sein, und was ich davon bemerkte, glaubte ich irgend welcher Unvollkommenheit des angewendeten Apparates zuschreiben zu können; doch liessen unter den sehr zahlreichen, aus einzelnen Tönen zusammengesetzten Klänge, welche ich beobachtete, beim plötzlichen Phasenwechsel von 0 zu $\frac{1}{2}$ viele einen recht merklichen Unterschied vernehmen, welcher nicht einem Fehler des Apparates zugeschrieben werden konnte; denn entfernte ich aus dem Klange auf einmal alle geraden Töne und wiederholte mit dem neuen, nur noch aus ungeraden Tönen bestehenden Klange dasselbe Experiment, so war ein solcher Unterschied nie mehr zu spüren. Darnach scheint in der That die Wirkung auf das Ohr eine andere zu sein, wenn in den Luftwellen ein sehr plötzlich erzeugtes Compressionsmaximum allmählich abnimmt, oder wenn die Compression erst allmählich bis zu diesem Maximum zunimmt und dann sehr plötzlich wieder verschwindet.

Dieses Ergebniss hat jedoch nöthig, noch weiter an verschiedenen, in ihrer Composition genau bestimmten Klängen geprüft zu werden; ganz bestimmt geht dagegen aus allen vorstehenden Untersuchungen folgendes Gesetz hervor:

Die Composition einer Anzahl harmonischer Töne, welche sowohl der gerad-, als auch der ungeradzahligen Reihe angehören, erzeugt, ganz unabhängig von der relativen Intensität dieser Töne, immer den stärksten und schärfsten Klang bei der Phasencoincidenz von $\frac{1}{4}$ ihrer Wellenlängen, den schwächsten und sanftesten bei der Phasencoincidenz von $\frac{3}{4}$ ihrer Wellenlängen, und die Klänge bei den Phasendifferenzen 0 und $\frac{1}{2}$ stehen sowohl, was ihre Intensität, als auch was ihre Schärfe anlangt, immer zwischen beiden.

Die Composition einer Anzahl harmonischer Töne, welche nur der ungeradzahligen Reihe angehören, gibt bei den Phasendifferenzen $\frac{1}{4}$ und $\frac{3}{4}$ einen gleichen Klang, und ebenso einen gleichen Klang bei den Phasendifferenzen 0 und $\frac{1}{2}$. der Klang bei den Phasendifferenzen $\frac{1}{4}$ und $\frac{3}{4}$ ist aber stärker und schärfer, als der bei den Phasendifferenzen 0 und $\frac{1}{2}$.

Wenn demnach auch wirklich die Klangfarbe hauptsächlich durch die Anzahl und die relative Intensität der harmonischen Töne bedingt wird, in welche sie sich zerlegen lässt, so ist der Einfluss der Phasendifferenz zwischen diesen harmonischen Tönen auf dieselbe doch keineswegs so gering, dass er ganz zu vernachlässigen wäre. — Man wird ungefähr sagen können, wenn der Wechsel in der Anzahl und relativen Intensität der harmonischen Töne Verschiedenheiten in der Klangfarbe hervorruft, wie sie an Instrumenten bemerkt werden können, welche verschiedenen Familien angehören, oder wie sie bei der menschlichen Stimme als verschiedene Vocale gehört werden, so ist doch der Wechsel in der Phasendifferenz zwischen diesen harmonischen Tönen noch immer im Stande, mindestens so grosse Unterschiede in der Klangfarbe hervorzurufen als verschiedene Instrumente derselben Gattung, und gleiche Vocale, von verschiedenen Stimmen gesungen, erkennen lassen.

Ich glaube, dass die blosse Beschreibung des Fig. V dargestellten Apparates, der mir bei vorstehenden Untersuchungen gedient hat, ausreichen wird, um erkennen zu lassen, dass derselbe auch für viele andere Experimente, vornehmlich aber für die künstliche Nachahmung von Klangfarben durch den Zusammenklang einfacher harmonischer Töne und Theiltöne geeignet ist. Man gebietet mit demselben in der That über sechszehn harmonische einfache Töne für jeden beliebigen Grundton, von denen jeder sich sofort in einen Klang mit regelmässig an Stärke abnehmenden Obertönen umwandeln lässt. Man kann ausserdem die Intensität jedes dieser Töne nach Belieben reguliren und zwischen allen Tönen jeden gewünschten Gangunterschied herstellen. Es ist schliesslich bis zu einem gewissen Grade

auch möglich, jeden dieser rein harmonischen Töne in einen etwas verstimmten oder selbst in einen unharmonischen Ton zu verwandeln, wie dies für die Composition von Tonmassen nothwendig ist, in denen unharmonische oder nicht ganz rein harmonische Theiltöne enthalten sind.

Indem ich mit dem Apparate ganz willkürlich die verschiedensten Tongemische bildete, erhielt ich öfters den Vocalen sehr ähnliche Klänge, doch hatten bis jetzt meine genaueren Untersuchungen über die Klangfarbe nur den oben erörterten Einfluss der Phasendifferenz der harmonischen Töne auf dieselbe zum Gegenstande.

Paris, Juli 1881.

Druck von Metzger & Wittig in Leipzig.